

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0002

NING Baoying. ESI top papers reveal the characteristics in Arctic natural science research[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 107-123. [宁宝英. ESI高影响论文揭示的北极自然科学研究特点[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):107-123.]

ESI高影响论文揭示的北极自然科学研究特点

宁宝英

(中国科学院西北生态环境资源研究院 文献情报中心,甘肃 兰州 730000)

摘要:在全球气候持续变暖背景下,北极地区冻土退化、冰川退缩、海冰减少等导致了一系列的生态环境问题,同时也使得资源勘探开发与国际新航道开通成为可能,北极地区的重要性日益凸显。依据2009—2019年6月期间有关北极研究的408篇ESI高影响论文,对发文量、主要作者、研究机构、国家、研究方向等字段进行分析,从自然科学角度,宏观而概要地了解北极研究中最具影响力的研究力量、研究领域,为中国的北极研究提供最精要的科研信息整体分析,并通过内容分析揭示北极研究中的重要方面和中国在当前北极研究中存在的问题及可行的策略途径。分析发现:美国引领并以绝对优势(论文数量、主要作者、机构、资助基金)占据北极研究领域。北极自然科学研究已形成以气候变暖为核心和背景,辐射相关海冰和海洋、生物与典型生态系统(生物多样性适应与保护、北方针叶林、苔原、微生物)、冰川退缩与冻土退化、大气天气与气候系统等领域的整体研究格局,呈现全面推进态势。研究已取得大量进展,研究手段呈现出大数据支持、模型运算为主的显著特征,但“不确定性”几乎渗透在其各个方面。中国以合作参与、外围相关、微量切入的形式开展北极研究,存在多重限制因素,我国可利用已有冰冻圈研究积累,积极参与各方面研究及数据共建共享,着重北极对中纬度气候影响等与我国社会经济密切相关的领域,从而为提升北极研究的科学话语权、为我国的防灾减灾和生态环境改善提供支持。

关键词:ESI高影响论文; 北极; 气候变暖; 冰川退缩; 冻土退化; 海冰减少

中图分类号:G353.1; P941.62 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-0240(2021)01-0107-17

0 引言

2019年3月13日,联合国环境规划署发布《全球纽带——图说变化的北极》报告^[1],该文件指出,即使实现《巴黎协定》制订的减排目标,到2050年北极冬季气温将在1986—2005年的水平上升高3~5℃,到2080年升高5~9℃,这将进一步强化北极地区冻土退化、冰川退缩、海冰减少和温室气体排放的正反馈,且导致全球海平面上升。这些变化将导致北极地区出现一系列的环境问题,与此同时,也使得该地区资源勘探开发与国际新航道开通成为可能。巨大的经济利益、重要的军事价值和科研价值、不可替代的国际战略与航道地位、对全球气候变暖的独特影响,诸多因素推动北极地区日益成为

各国政府和学术界关注焦点^[2-5]、国际战略地位愈加彰显,各国围绕北极地区的权益博弈也日趋激烈。

2006—2014年期间,北极理事会的8个成员国先后出台了北极政策或战略。中国于2018年发布《中国的北极政策》白皮书,明确了中国是北极事务的利益攸关方^[6]。北极自然科学信息获取及创新性研究,是认识北极、保护北极和利用北极的基础。国内学者从北极的环境^[7]、能源^[8]、航线^[9-11]、环北极重要国家的北极政策等^[12-15]方面综述了北极研究进展。除领域研究外,文献计量分析因可提供整体视角、揭示隐含信息、发现知识关联也被运用到北极研究中:牛艺博等^[16]基于2010—2016年源自SCIE和SSCIE的46000多条数据,分析了全球极地研究的发展格局和变化趋势;於维樱^[17]等单独以北极地

收稿日期:2019-08-09; 修订日期:2020-06-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503703)资助

作者简介:宁宝英,研究员,主要从事生态经济与科技情报分析研究. E-mail: ningby@llas.ac.cn

区海洋为对象,通过计量分析研究其发展态势。目前研究论文众多,各方面都显得很重要。但是总体上,哪些研究是最热的、最重要的,最核心的研究力量如何分布,重要进展及其相互间的联系等,尚不明确。

ESI 高影响论文(ESI top paper,包括ESI 热点论文 hot paper 和ESI 高被引论文 highly cited paper)作为ESI 评价体系中的基本指标,是当今世界范围内评价国家或地区、学术机构、个人学术水平及影响力的重要评价依据。北极研究的 SCIE 论文数量庞大,相较于使用全部 SCIE 文献所做的大量分析,基于高影响论文的分析可宏观而概要地揭示北极研究中最具影响力的研究力量、最核心的研究领域和最新的重要进展,从而为了解中国目前在北极自然科学研究中的地位、明确今后重点发展方向、开拓极地国际合作新疆域、提升极地快速变化应对能力、打造极地全球共治的中国范式提供最精要的信息。

1 检索策略与数据分析方法

北极地区有多种定义:地理学的定义是指北极圈(66°34'N)以北地区,以极昼和极夜为主要特点;此外还有基于气候学、生态学、物候学、文化历史学、社会学和政治学等的定义。本文采用地理学定义,北极地区包括北冰洋、边缘陆地海岸带及岛屿、北美大陆和欧亚大陆的北极苔原和最外侧的泰加林带,环北极国家指加拿大、美国、俄罗斯、挪威、瑞典、芬兰、冰岛和丹麦 8 国^[18]。

检索策略为主题检索。在 SCIE 数据库中,以与北极有关的地理学名词作为关键词,检索相关 SCIE 文献,并在检索结果中遴选 ESI 高影响论文为分析对象。主题词包括 3 部分:(1)北极与北极地区;(2)北冰洋及相关岛屿和群岛;(3)北极苔原和北极泰

加林(又名:北方针叶林),文献类型限定为 Article、Letter 和 Review^①。截止 2019 年 6 月 1 日,SCIE 文献 82 000 多篇,其中 ESI 高影响论文 598 篇,经过文献题录信息阅读,剔除不相关文献后,确定进入分析范围的文献为 408 篇。

数据分析采用 EXCEL 和 VOSViewer,其中 VOSViewer 软件可通过共现分析呈现字段的网络结构关系,在进行作者、机构和国家分析时,编写了字段叙词表以合并同义词。此外,分析中还结合文献阅读和内容分析。

2 分析结果

2.1 文献数量年际分布

ESI 统计时间段为近 10 年,每两个月更新一次数据。2019 年目前有 3 篇为高影响论文(因 2019 年数据为截止检索日的部分数据,故未在图 1 中显示)。2009—2018 年高影响论文数量较为稳定,每年在 40 篇左右,以 2014 年分界,前 6 年波动上升,从 37 篇增加到 52 篇,自 2014 年后逐渐下降,2018 年为 31 篇,近 5 年数量下降的部分原因为文献存在引用周期。结合全部 SCIE 发文数量,整体发文呈平稳较

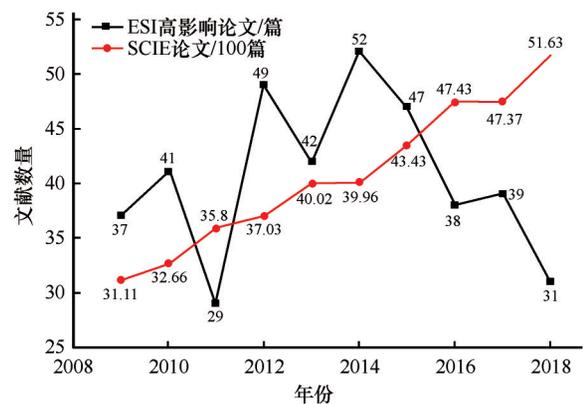


图 1 ESI 高影响论文数量 2009—2018 年际分布

Fig. 1 ESI top papers during 2009—2018

①检索式:ts=((Arctic NOT "sub Arctic") OR "North Pol*") or (("Arctic Ocean") or ("Beaufort Sea") or ("Greenland Sea") or ("Barents Sea") or ("Novaya Zemlya") or ("kara strait") or ("Franz Josef Land") or ("Kara sea") or ("Karskoje More") or ("Severnaya Zemlya") or ("bolshevik island") or ("october revolution island") or ("komsomolets island") or ("pioneer island") or ("maly taymyr island") or ("starokadomskogo island") or ("schmidt island") or ("Laptev Sea") or ("Greenland") or ("Spitz Bergen island") or ("The Svalbard archipelago") or ("West Spitsbergen") or ("Nordauslandet") or ("North East Land") or ("Barents Island") or ("Baffin Island") or ("taymyr peninsula") or ("Vilkitskogo Strait") or ("Vilkitsky") or ("Chelyuskin") or ("The East Siberian sea") or ("Chukchee Sea") or ("Lomonosov Ridge") or ("Mendelejev ridge") or ("Alpha Ridge") or ("Norskehavet") or ("White Sea") or ("The Canadian Basin") or ("the marble ocean basin") or ("the South Sen basin") or ("new siberian island") or ("Novosibirskiye Island") or ("Lyakhovskye Island") or ("De Long Island") or ("Belkovsky Island") or ("Kotelnny Island") or ("Bunge Island") or ("Faddeyevsky Island") or ("Dmitry Laptev Strait") or ("Arctic Archipelago") or ("Wrangel Island") or ("Chukchi Peninsula") or ("Lofoten basin") or ("Kola Peninsula") or ("Kolguev island") or ("Scandinavian Peninsula") or ("Pechora Sea") or ("White Sea") or ("Gustaf Adolf") or ("Lincoln Sea") or ("Proliv Karskiye Vorota") or ("Boothia Gulf") or ("Fram Strait") or ("Amundsen Gulf") or ("Vaygach island")) or ("Arctic tundra" or "Tundra zone" or "Arctic Taigan" or "boreal forest" or "Siberia* taiga forest")))

快上升趋势,说明对该领域的关注在持续增强。

2.2 主要研究力量

2.2.1 作者

高影响论文作者之间几人成群、不同作者群之间相互独立、作者合作关系松散。较大的作者群有:以美国 Colorado 大学的 Stroeve, Julianne C. (研究重点为北极海冰分布与模拟)、荷兰 Utrecht 大学的 Van Den Broeke, Michiel R. (研究重点为格陵兰冰盖对海平面变化的贡献)为核心的作者群。发文最多的通讯作者是英国 Exeter 大学的 Screen, James A. (7篇),研究重点为北极海冰与北极放大效应。

2.2.2 机构

408 篇论文涉及了 884 个机构,共出现 2962 次,篇均 7.26 个机构。高影响论文的多机构合作创新特点明显。

发文量超过总量 5% 的机构有 16 个(表 1),10 个为美国机构,且排名前 8 位的均为美国机构:阿拉斯加大学排名第一,发文 90 篇,其次是科罗拉多大学(80 篇),第三名是美国国家海洋和大气管理局

(62 篇);加利福尼亚大学、华盛顿大学、美国国家航空航天局、美国国家大气研究中心、加州理工学院依次排第 4~8 位。中国科学院排名第 9。其次是欧洲瑞典、俄罗斯、德国、荷兰的机构和加拿大阿尔伯塔大学。

在所有机构间,相互关联强度处于前 30 位的机构,形成了密切的互联合作网络(图 2),并形成较明显的合作聚类:(1)核心——美国:以多个美国机构(华盛顿大学、科罗拉多大学、美国国家航空航天局、美国国家海洋和大气管理局、加州理工学院、美国国家大气研究中心)形成的合作聚类;(2)中间——环北极:美国阿拉斯加大学、荷兰乌得勒支大学、瑞典斯德哥尔摩大学、芬兰赫尔辛基大学、挪威奥斯陆大学、加拿大阿尔伯塔大学、丹麦奥胡斯大学基本为环北极国家顶尖大学合作聚类;(3)外围——跨地域:以美国哥伦比亚大学和伍兹霍尔海洋研究所、法国巴黎大学、德国赫姆霍兹海洋研究中心和马克斯普朗克化学研究所、英国爱丁堡大学、中国科学院构成的最大地域跨度合作聚类。

表 1 主要机构

Table 1 Major institutions of publication which has published papers over 5% of the total

排序	发文量/篇	机构(国家)	机构(中文名称)
1	90	Univ Alaska	阿拉斯加大学
2	80	Univ Colorado	科罗拉多大学
3	62	NOAA	美国国家海洋和大气管理局
4	61	Univ Calif	加利福尼亚大学
5	59	Univ Washington	华盛顿大学
6	50	NASA	美国国家航空航天局
7	38	Natl Ctr Atmospher Res	美国国家大气研究中心
8	30	CALTECH	加州理工学院
9	28	Chinese Acad Sci(中国)	中国科学院
10	27	Stockholm Univ(瑞典)	斯德哥尔摩大学
11	26	Russian Acad Sci(俄罗斯)	俄罗斯科学院
12	25	Alfred Wegener Inst(德国)、Ohio State Univ	阿尔弗雷德韦格纳研究所、俄亥俄州立大学
13	24	Univ Alberta(加拿大)、Univ Utrecht(荷兰)	阿尔伯塔大学、乌得勒支大学
14	21	Columbia Univ	哥伦比亚大学

注:未标注所属国家的机构均为美国。

2.2.3 主要国家

因 1 篇文章中,可出现多个国别信息,因此,单纯统计国家的频次不足以说明问题,此处采用百分比来显示。

以全部作者计,408 篇文献涉及 60 个国家,文献量的国家占比(表 2)中,美国以绝对优势领先,占总量的 4 成,其次是英国、加拿大、德国,占比在 6%~

9% 之间;挪威和法国占比接近 5%,其余的(澳大利亚、荷兰、瑞典、丹麦、俄罗斯、中国、瑞士)在 2%~3% 之间,中国占比 2.19%。这些国家中,除环北极国家外,就是积极参与北极事务的国家。

以通讯作者计和以第一作者计的国别分布略有差别,前 5 位顺序不变,前 4 位第一作者占比略高于通讯作者,美国占比增加至 45%。澳大利亚、新

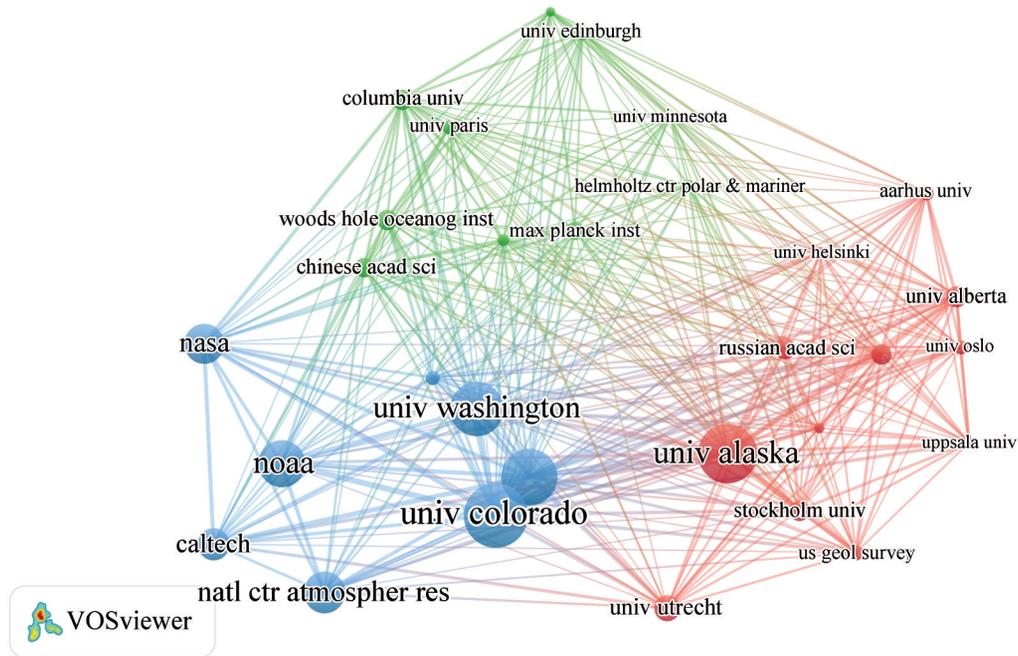


图2 主要机构合作网络(图2~4均为VOSviewer共现分析的网络视图:圆圈及其标签组成一个元素,其大小代表权重高低,其颜色代表所属的聚类,元素间连线粗细代表联系强弱)

Fig. 2 Cooperation network among the major institutions (Figures 2~4 are all network visualizations of VOSviewer based on co-occurrence analysis; an item is represented by its circle and label, the size of which represents the weight, the higher the weight of an item, the larger the label and the circle of the item; the color represents the cluster to which it belongs; and the thickness of the line between two items represents the strength of their links, the thicker the line, the stronger the link)

表2 主要发文国家

Table 2 The major countries of publication

国家	全部作者/%	国家	通讯作者/%	国家	第一作者/%
USA(美国)	40.45	USA(美国)	45.88	USA(美国)	45.59
UK(英国)	9.08	UK(英国)	11.36	UK(英国)	12.25
Canada(加拿大)	7.80	Canada(加拿大)	7.80	Canada(加拿大)	8.58
Germany(德国)	6.11	Germany(德国)	6.01	Germany(德国)	6.13
Norway(挪威)	5.00	Norway(挪威)	5.79	Norway(挪威)	5.39
France(法国)	4.46	Australia(澳大利亚)	2.90	Netherlands(荷兰)	2.94
Australia(澳大利亚)	2.90	Netherlands(荷兰)	2.90	Australia(澳大利亚)	2.70
Netherlands(荷兰)	2.84	Sweden(瑞典)	2.67	Sweden(瑞典)	2.21
Sweden(瑞典)	2.77	Peoples R China(中国)	2.45	Others(其他)	14.22
Denmark(丹麦)	2.30	Denmark(丹麦)	2.23		
Russia(俄罗斯)	2.23	Others(其他)	10.02		
Peoples R China(中国)	2.19				
Switzerland(瑞士)	2.16				
Others(其他)	12.26				

西兰和瑞典三类占比基本相同。变动较为明显的国家包括:全部作者法国占比4.46%,而在通讯作者和第一作者国家占比均降至2%以下;中国第一作者占比不到2%,而通讯作者占比为2.45%;俄罗斯、瑞士仅在全部作者中占比超过2%,而在通讯作者和第一作者占比中降至2%以下。通常认为,第

一作者、通讯作者、参与作者在一篇文章中的角色定位依次为执行者、领导者、参与者,而中国是唯一通讯作者、参与作者、第一作者占比依次降低的发文国家,但占比差别很小。

发文超过4篇的31个国家间形成了密切的合作关系(图3),美国处于绝对领先的核心地位,合作

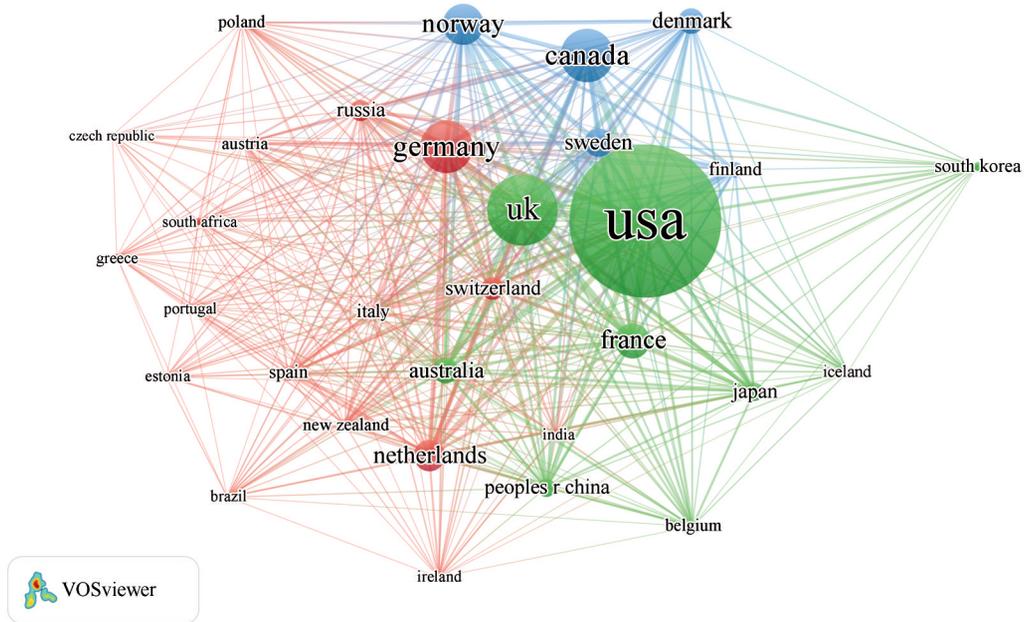


图3 主要国家合作网络

Fig. 3 Cooperation network among the major countries

关系中明显地形成3个合作聚类:美国、英国、法国、澳大利亚、日本、中国、韩国、冰岛和比利时合作紧密;环北极国家(挪威、加拿大、丹麦、瑞典、芬兰)形成密切合作关系;欧洲国家(德国、荷兰、俄罗斯、波兰、西班牙、意大利、瑞士、葡萄牙、奥地利、冰岛、捷克、爱沙尼亚)与新西兰交错合作网。

2.3 主要基金资助机构

366篇标注了基金资助机构信息,共1 676个,篇均4.11个(表3)。数量最大的基金资助机构是美

国国家自然科学基金,有211项,其次是英国自然环境研究委员会(104项)、美国国家航空航天局(100项)。在基金数量不低于10项的资助基金机构中,美国的还有美国能源部(69项)、美国国家海洋和大气管理局(55项)、美国地质调查局(13项),总计448项,占总量的26.73%,数量占绝对优势。另外4个环北极国家(加拿大、挪威、瑞典和芬兰)的资助基金在11~31项之间。澳大利亚研究委员会、德国联邦教育和研究部、中国国家自然科学基金在10~13

表3 主要基金资助机构

Table 3 The major Funding Agencies

基金资助机构	基金数量/项	中文名称
NSF	211	美国国家自然科学基金
Natural Environment Research Council UK	104	英国自然环境研究委员会
NASA	100	美国国家航空航天局
US Department of Energy	69	美国能源部
EU	68	欧盟
NOAA	55	美国国家海洋和大气管理局
Natural Science and Engineering Research Council of Canada	31	加拿大自然科学与工程研究委员会
Norwegian Research Council	26	挪威研究委员会
USGS	13	美国地质调查局
Australian Research Council	13	澳大利亚研究委员会
Swedish Research Council	12	瑞典研究委员会
Academy of Finland	11	芬兰科学院
German Federal Ministry of Education and Research	11	德国联邦教育和研究部
NSFC	10	中国国家自然科学基金
全部基金总数	1 676	

项之间。

中国资助基金数量共有 26 项,占全部基金数量的 1.55%,若以第一资助基金统计,仅有 7 项,占第一基金总量(366 项)的 1.91%,基金占比与人员参与合作占比、发文量占比相比较,基金占比更低。

高影响论文字段分析结果揭示美国在北极研究中的绝对优势地位,几近占据半壁江山。相比之下,作为非环北极国家的中国各项指标(论文数量、作者、机构、资助)仅在 2% 左右,在北极研究影响力方面相当弱,反映出中国北极研究的合作参与、外围相关(以与北极相关的青藏高原、北大西洋为主、未真正深入北极核心区;数据获取多为间接式、分析方法以模拟为主;国家间合作关系网络中处于边缘位置)、微量切入(中国作者量少、第一作者论文

仅有 8 篇)的特点。这一方面与不占地利有关,一方面可能与平台有关,例如高影响论文主要发表期刊为美英期刊(美国、英国、德国、荷兰依次有 11、4、2、1 个,美国期刊数量绝对领先)。

3 主要研究领域

3.1 研究类别与研究方向

在 254 个 WOS 类别和 153 个研究方向中,403 篇高影响论文涉及的 WOS 类别和研究方向主要分布在地学和地质学(20%)、气象学和大气科学(16%)、环境科学(11.63%、16.11%)、海洋学(5%)、自然地理学(5%)(表 4),总体上高影响论文形成以地学为主,环境科学其次的以地、人地关系为两大核心的研究格局。

表 4 主要 WOS 类别和研究方向

Table 4 The major WOS categories and research areas

WOS 类别/总频次 602	占比/%	研究方向/总频次 571	占比/%
Geosciences, Multidisciplinary	19.77	Geology	21.37
Meteorology & Atmospheric Sciences	16.28	Meteorology & Atmospheric Sciences	17.16
Multidisciplinary Sciences	13.95	Environmental Sciences & Ecology	16.11
Environmental Sciences	11.63	Science & Technology - Other Topics	14.71
Oceanography	5.65	Oceanography	5.95
Geography, Physical	4.98	Physical Geography	5.25
Ecology	4.82	其他	19.44
其他	22.92		

3.2 研究内容

依据论文中的作者关键词(仅 40% 文献含作者关键词信息,表 5),利用关键词之间的共现关系,形

成基于作者关键词的研究内容网络(图 4),为更清晰展现关键词之间的关系,图中未含检索词 Arctic。可以看出,北极地区研究,高影响论文揭示出以气

表 5 高频作者关键词

Table 5 High frequency author keywords

频次	关键词(英文)	关键词(对应的中文翻译)
45	climate change	气候变化
33	Arctic	北极
21	sea ice	海冰
8	permafrost	多年冻土
7	climate, model	气候、模式
6	Arctic ocean, climate model	北冰洋、气候模式
5	boreal forest, prediction, snow	北方针叶林、预报、雪
4	Arctic amplification, Arctic oscillation, biogeography, blocking, circulation, climate-change impacts, feedback	北极放大、北极涛动、生物地理学、阻塞、环流、气候变化影响、反馈
3	aerosol, bacteria, carbon cycle, carbon dioxide, conservation, deglaciation, disturbance, diversity, dynamics, ecological niche, ensembles, fish, ocean, oceanography, phylogeography, plant functional type, population dynamics, remote sensing, temperature, temporal trend, vegetation	气溶胶、细菌、碳循环、二氧化碳、保护、冰川退缩、干扰、多样性、动态、生态位、群落、鱼类、海洋、海洋学、系统地理学、植物功能类型、种群动态、遥感、温度、时间趋势、植被

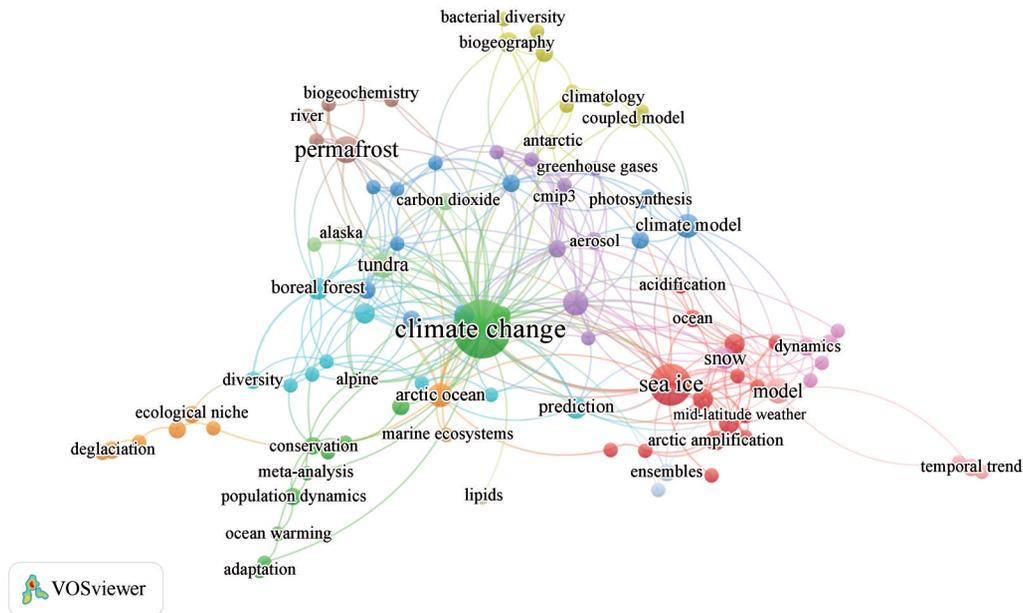


图4 作者关键词网络

Fig. 4 Author keywords network

候变暖为核心和背景,辐射相关海冰和海洋、生物与典型生态系统(生物多样性适应与保护、北方针叶林、苔原、微生物)、冰川退缩与冻土退化、温室气体和气溶胶、气候影响等领域的整体研究格局。为补充因数据库作者关键词字段缺失造成的信息展示不充分,对全部文献的摘要和部分全文进行了阅读,并据此对主要研究内容的阐述进行细节补充。

3.2.1 海冰与海洋研究

气候变暖引起的海冰减少(sea ice loss),是海冰研究中的重点和基调,对其减少机制的探究(如atmosphere-ocean interaction,注:3.2.1~3.2.4节中每部分第一段中括号内的英文单词为该关键词相关领域的词汇,并非一一严格对应的翻译)和模拟(model intercomparison)是重要内容,由于海冰减少而正向反馈的北极放大效应(arctic amplification)、海冰融化后的冷淡水外流,对北半球洋流(circulation)及气候变率(climate variability、mid-latitude weather、atmosphere circulation)的影响也是重要方面,海洋酸化(acidification)和微塑料污染(marine microplastics pollution)也是北极面临的两大环境压力。

15.2%的(62篇)文献讨论海冰,主要内容包括海冰总量减少、一年冰增多、结冰期延迟。海冰呈减少趋势是共识,分异点在于减少的时空异质性、原因和影响、夏季无冰期的出现时间和持续时间。(1)海冰减少。Cavalieri和Parkinson^[19]基于北极地

区32年(1979—2010年)卫星被动微波辐射计数据,分析北极海冰趋势,认为除白令海外,海冰范围和面积的年际趋势均为负值,在海冰范围和面积的季节性基础上,夏季的负向趋势最大,秋季的负向趋势次之。2012年9月13日,北极海冰范围达到有卫星记录以来的最低点,为 $3.4 \times 10^6 \text{ km}^2$,海冰面积 $3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[20]。(2)海冰减少的原因。原因多样,包括:每年增加的1000~500 hPa厚度场^[21]、夏季大气环流的趋势^[22-23](被认为可能对1979年以来9月海冰范围下降贡献率高达60%)、秋冬季潮湿空气^[24]、表面混合层的出现(斯瓦尔巴北部)^[25]、大量淡水的注入^[26-29]、尤其是大西洋暖水的注入^[30-32],加剧海冰减少。在波弗特海的研究认为,海冰减少与海洋热释放引起的周期性逆转有关,海洋热释放引起的秋季冰前进的周期性逆转,秋季风浪使上层海洋的热量混合到表面,然后使刚形成的薄、新冰层融化^[33]。(3)一年冰增多。北极海冰覆盖正在从多年冰向季节性冰转变,季节性冰更低的反照率加速海冰减少的正向反馈,并使夏季无冰期延长^[34-36]。(4)结冰期延迟。在过去的十年中,北冰洋表面温度增加了 $0.5 \sim 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$,这在很大程度上解释了北冰洋附近海域秋季结冰的延迟现象^[37]。

海冰减少造成影响是多方面的、综合性的、全球性的^[38],包括大气系统、生态环境、人类生产生活等多个领域:(1)对北半球中纬度气候的影响:秋季北极海冰面积的减少,一是导致大气水汽含量增

加,冬季多雪;二是使阻塞模式出现得更加频繁,寒潮加剧^[38-39]。北极海冰减少促使北半球冬季出现极寒天气的可能性增加^[40-45],并被认为是中国华北平原冬季雾霾的成因之一^[46-47]。(2)对生态的影响:生产力、物种相互作用、种群混合、基因流动、病原体和疾病传播^[48]。(3)对人类生产生活的影 响:北极海冰减少削弱了大西洋经向翻转环流^[49]、若海冰持续减少到21世纪中叶可通航新的跨北极航线^[50]。

海洋酸化是北极海洋研究重点之一,其整体趋势模型表明^[37],到本世纪末,在IPCC A2方案中,地表水的pH值将从工业前的8.2下降到大约7.8,相对于工业时代的开始,海水酸度明显增加。海洋酸化对海洋生物从个体生理到种群结构均产生负面影响:海洋酸化可能改变幼虫行为和损害其感官能力,从而对鱼类繁殖造成重大威胁^[51]。

3.2.2 生物与生态系统

苔原带(tundra, shrub tundra)、高山带(alpine)和北方针叶林(boreal forest)等陆地生态系统(terrestrial ecosystem)、北冰洋生态系统(marine ecosystem)及多种生物(vegetation, plant functional type, fish)在面对环境变化(warming, wildfire, disturbance, sea level rise)时,生物从个体生理表征(photosynthesis, respiration)、生态系统从整体响应(dynamic vegetation model, feedback, ecosystem function, population dynamics)两个层面适应(adaptation)气候变暖的影响。人类也开始注意并保护(conservation)北极生物多样性(diversity, species richness)。生物地理学(biogeography)中,细菌(bacterial diversity, bacteria)和古生菌(archaea)被重点关注。

变暖背景下,北极生态系统出现一系列变化:(1)北冰洋初级生产继续增加^[52],藻类^[53-54]和浮游植物^[55]大量繁殖,北冰洋大陆架生物生产力增加^[56];(2)生物群落向北扩展,大型洄游鱼类捕食者的丰度和分布区域的增加;北极大陆架鱼类群落向北到达与深极地盆地接壤的较深区域^[57];灌木扩张^[58-59];植被区转移,木本覆盖增加52%^[3];北极苔原被重塑^[60];苔原和北方森林中植被分布出现新模式^[57,61];(3)北极苔原对气候变暖的反映增强^[62];(4)火灾风险增加,北方森林在温暖和干燥条件下可以维持几个世纪的高强度火灾状态^[63],闪电是近几年北美北部森林大火的主要驱动力^[64];(5)生物种群面对压力的适应。北冰洋似乎

正经历着从极地向温带模式的根本转变,这可能会改变海洋生态系统,如海洋哺乳动物的亚区系和栖息地变化^[65];不同鱼类的温度容忍度不同,受到的影响不同:巴伦支海鳕最近显著增加^[66],鲑鱼则通过每次产更高数量的卵维持遗传多样性^[67];气候变暖可能导致全球渔获潜力的大规模再分配,高纬度地区的平均增长率为30~70%^[68];51份北极海洋生物群对气候变暖反映的报告可基本代表当前概况^[69],内容包括:丰度、生长/条件、行为/物候和群落/领地变化,其中大多是关于海洋哺乳动物(特别是北极熊)和鱼类的,充分记录浮游生物和底栖生物的文 献惊人的少,且明显缺乏北冰洋特有物种、冰藻产量及相关群落的物种丰度和分布的定量报告,广大的西伯利亚大陆架和北冰洋中部等地区的文献中几乎没有关于气候变暖对海洋生态影响的文献,尽管气候变暖的性质让人担忧,且其对北冰洋有强大的潜在影响,但评估气候变暖对该区影响的研究工作却相当有限。(6)细菌的生物多样性改变,分为物种和群落两个层面,如甲烷营养细菌^[70]和土壤细菌群落^[71]的生物多样性,Chu^[71]认为细菌群落分布的控制因素与宏观生物群落存在根本的不同,生物群落定义对预测全球土壤微生物多样性没有帮助。(7)污染物浓度增加。主要涉及微塑料、汞、溴化阻燃剂、有机氯农药、聚氟和全氟有机化合物、石油、过氧乙酰硝酸盐、有机卤素、有机磷酸酯、多溴二苯醚等污染物的分布、输送、生物富集及对生物体的影响。北冰洋成为微塑料的沉淀池^[72-73],但微塑料和生物间的相互作用仍需进一步研究^[74]。污染物还产生连带影响,如过氧乙酰硝酸盐分解释放的氮氧化物分别占北极表面臭氧生成量的93%和55%^[75]。

3.2.3 冰川退缩与冻土退化

北极地区气候变暖,导致陆上冰川尤其是格陵兰冰盖和沿海冰架崩解(ice sheet dynamics, deglaciation),北极苔原多年冻土(permafrost)退化致溶解有机碳(dissolved organic carbon)和重金属(heavy metal)成分释放,改变了整体水环境(aquatic environment)的生物地球化学组分。

38篇文献研究格陵兰冰盖、冰川物质平衡亏损成因、程度与时空分布、动力学过程与机制、对海平面上升的贡献。(1)成因。基本认同是热力而非动力造成冰川物质平衡亏损^[76-80]。(2)程度与时空分布。物质平衡亏损数量在增加是共识,加拿大北极

群岛冰川和冰盖的质量损失急剧增加^[81];格陵兰冰盖2012年夏季冰川融化创造了多个新记录:自有卫星数据以来融化的量最多、97%的冰层有融化、融化期比1979—2011年的均值长近2个月^[82];2012年7月12日的格陵兰冰盖的极端融化事件中,表面或其附近发生的融化占其整个范围的98.6%,甚至包括通常是冷极区的高海拔地区,如干雪相成冰的山顶^[83]。(3)动力学过程与机制。格陵兰西北部海洋出口冰川运动速度加快^[84],多个研究认为冰下排水是加速冰川运动的原因,如冰川锅穴的存在使融水进入冰川内部^[85]、高压的冰下水和基底沉积物驱动的冰床界面运动^[86],但也有研究持相反论点^[87]。冰流排水网络与物质平衡变化、冰川内部动力反馈机制的关系基本未知,是未来工作需要补充的一个关键领域^[88]。冰盖和冰川融化的机制除了变暖融化外, Van Tricht等^[89]认为云层是格陵兰冰盖径流的主要驱动因素,有云层比晴空时融水径流增加约三分之一; Bennartz等^[90]认为液态水滴组成的低层云(“液态云”)的辐射效应在这一融化事件中起到了关键作用; Ryan等^[91]认为冰盖表面分布式生物源活性杂质控制的格陵兰冰盖暗区解释了73%的观测到的反照率空间变异性。(4)对海平面上升的贡献。研究普遍认为,格陵兰冰盖的物质平衡亏损及其对海平面上升具有重要贡献,差异在于使用不同数据集和模型得出的具体数量。

冻土退化、冻土环境显著变化。(1)冻土升温不均匀。与低温多年冻土相比,高温多年冻土的升温速度要小得多,低温多年冻土层正在迅速变暖^[92]。(2)冻土区水文变化,主要表现为径流增加。冻土退化形成淡水^[93],融雪与大量储存在有机土壤和湖泊中的水混合并置换而产生径流^[94]。冰楔退化和由此引起的地面差异沉降相关的水文变化将扩大^[95]。Walvoord和Kurylyk^[96]系统论述了多年冻土退化的水文影响,认为多年冻土水文领域在多尺度观测、地下特征、模型构建以及与其他学科的整合等方面正在迅速发展,但预测气候变暖的相关后果是长期挑战。研究的难题包括:(1)研究条件不足:模型不具体、冻土区的水文地质特征信息不充分、缺乏历史数据、结构和过程表示太简单满足不了模型模拟的高计算要求;(2)自然条件的复杂性:多年冻土的地下非均质性、融化模式和速率的不均匀性、多年冻土退化模式和水文变化之间的联系不易扩展、变化轨迹也可能不同。

3.2.4 大气、天气与气候系统(温室气体和气溶胶、大气耦合模式比较计划、中高纬度天气)

气候变暖背景下,北极地区进入大气的温室气体(greenhouse gas),尤其是冻土退化释放的 CH_4 和 CO_2 等,改变气溶胶(aerosol)组分,影响全球碳循环(carbon cycle)。为系统观测北极地区大气环境变化而组织实施的大型大气研究计划(CMIP3、CMIP5),采取实测和模拟(climate model)的形式记录和预测(spatial trend、temporal trend)北极气候变暖对北极土地利用变化(land use change)和整个地球系统的影响。

冻土退化释放温室气体受到极大重视。北半球高纬度地区有两个巨大的碳库:多年冻土和北方针叶林。在碳的释放方面,除 CO_2 外, CH_4 研究近来受到的重视很多。(1) CH_4 排放。2008年时北极地区的 CH_4 排放增长几乎为0,说明当时多年冻土和甲烷水合物对气候的强烈反馈还未被激活^[97],当时排放总量中仅2%来自北极地区^[98]。在当前观测到的气候变暖面前,二者极易失稳,且失稳的速度和强度预期会随着时间的推移而增加^[99]。21世纪 CH_4 排放的形式将从化石燃料转变到生物甲烷^[100]。多年冻土 CH_4 排放量受温度、水文条件、活动层厚度、植物组成、微生物组成多要素影响,相互间作用存在非线性的复杂性,这使得 CH_4 排放对多年冻土退化的响应具有很大不确定性^[101]。(2)甲烷水合物。东西伯利亚北极大陆架沉积物^[102]和西斯匹次卑尔根大陆边缘海床^[103]发现 CH_4 排放源,但目前还没有确凿证据表明水合物衍生甲烷正在进入大气^[104-105]。存在的关键问题包括: CH_4 排放对气候系统的反馈在多数全球气候变暖模型中未被考虑到;冻土退化过程中土壤微生物对 CH_4 的影响机理;冻土退化对 CH_4 排放影响的空间异质性。

气溶胶。Wofsy等^[106]认为北极上空有高密度污染物、黑炭和生物源 CH_4 。生物质燃烧被认为是北极地区一次和二次有机气溶胶的主要来源^[107]。Kawamura等^[108]从分子水平解释了气溶胶中水溶性二羧酸及其相关化合物的地理变异性、大小分布、来源和形成途径。

35篇文献论述了北极变暖、北极放大效应对北半球中高纬度天气和气候的影响。主要的发现有:中纬度天气对北极变化呈非线性响应^[109]、在可预见的未来无法量化北极变化对中纬度天气的影响^[110]、无论是海冰损失还是人为因素都不是大陆变冷的原

因^[111]。(1)影响具有区域差异性。虽然多项研究^[112-114]认为欧亚大陆极寒与北极变暖有关,但北极变暖对北美和东亚冬季寒冷的影响截然不同^[115]。(2)影响机制不同。北极变暖或通过增加阻塞^[116-117]、或通过影响中纬度急流^[118-119];而北极放大通过减小北半球中高纬度地区的温度变化^[120]、调节大气行星波振幅变化^[121-122]来影响北半球中高纬度天气。尽管有如此多的研究试图发现两者之间联系,“不确定性”仍是该部分研究中几乎所有文献都在提及的说明。

3.2.5 其他

除以上重点研究内容,关于北极古气候和古环境反演的文献有20篇,这为从地质历史的时间尺度审视当前的变化提供了宏大的视角和参照。主要是使用冰芯记录、湖芯记录、植物DNA、贝壳。

此外,有49篇数据集和模型介绍论文,揭示北极研究以大数据支持、模型运算为主的突出特点。北极研究立足北极,着眼全球,以行星地球的整体视角获取分析数据、建立对比参照系。研究基于强大的数据支持、平台支撑的构建和优化。(1)数据源类型有:长序列多站点观测数据、采集样本分析数据、遥感和卫星数据、气象再分析数据、融合数据集;数据获取方法有:现场采集(使用无人机观测是近两年发展起来的技术)、(冰芯、气溶胶、纹泥、树轮、黑炭)样本分析、遥感、共享(再分析数据)。数据分析手段主要是构建模型、大数据推演。(2)专门介绍模型的论文有23篇,运用模型、优化模型组件被运用于北极研究的诸多方面。

3.3 关键科学问题

纵观408篇论文研究内容及其进展,认为北极自然科学研究中的关键科学问题涉及四个方面。其共同点是不确定性,减少或消除这些不确定性,是北极自然科学研究取得突破的基础。

3.3.1 气候变暖的本底认识和预测

气候变暖在北极更地域性地表现为北极放大,形式上体现为冰冻圈变化(冰川退缩和冻土退化)、海洋变化(海洋暖化、海冰减少)等;目前的关键问题是气候变暖的本底认识和预测中不确定性的解决,比如确定“工业前时期”的期限、开发完全耦合的气候平衡模型来模拟和告知气候变暖的影响。既涉及基础本底数据(冰川、冰盖、冻土和海冰的数量、性质及分布)、变化情况(格陵兰冰盖物质平衡亏损量、北极海冰损失量、何时出现季节性无冰北冰洋、海平面升高多少)、又涉及数据观测和预测模

式水平。如何从自然的气候变化噪声中识别出气候变化信号,是气候预测和风险评估的关键。

3.3.2 气候变暖的影响

气候变暖的影响是多方面的,多项案例研究从物种、群落和生态系统三个尺度上展现了其对生态的影响。气候变暖对温室气体排放的影响是北极研究中的重点,其关键问题是碳循环的不确定性:(多年冻土中的有机质、北极地下和水下多年冻土中的甲烷水合物)碳含量有多少、北极碳循环的敏感性高低、碳释放量和时间、陆地生态系统和碳循环间的反馈(多年冻土碳反馈的强度、时间及其相关因素)、碳动态变化与可能影响其变化的过程。

3.3.3 多圈层相互作用机制

北极研究中存在多个多圈层相互作用,典型的如大气-海冰-海洋中海冰减少与北极放大间的正反馈机制,目前倾向于认为是全球变暖-海冰减少-海洋水温增加-加热大气变暖-海冰减少。圈层内部要素的微观机理(如云微物理性质和过程、辐射通量)、宏观运动(如大气和海洋中普遍存在非线性的混沌运动)、圈层间相互作用的因果关系和反馈(北极海冰减少与北极陆地生态系统变化之间的联系),除微观机理有相对较为明确和量化的认识外,后两者的不确定是北极研究中的难点和关键。

3.3.4 北极对中纬度天气的影响

Cohen^[123]认为最终影响中纬度天气的因素是大气中风暴轴、急流和行星波动的变化,而影响这些变化的要素包括全球变暖、极地放大、海冰变化、极涡、气候内部变率、太阳活动周期、火山喷发等,众多要素综合作用,极大增加了北极影响中纬度天气的不确定性,如何有效提炼出北极对中纬度天气的影响便是其中的科学难题。北极变化对北半球气候影响的可能性,存在相当大不确定性,因为潜在联系的时间序列很短(小于10年),还需了解北极变化对混沌气候系统的直接作用力的相对贡献。大气动力机制是进一步研究的方向,北极变化对中纬度天气的定量影响在可预见的未来可能无法解决。

4 趋势与展望

4.1 趋势

北极研究可分为四个重要研究方向:海冰与海洋;生物与生态系统;冰川退缩与冻土退化;大气、天气和气候系统。四个研究方向年度研究主题词或重要进展10年变化(表6)揭示:海冰减少、格陵兰

表6 四个研究方向年度研究主题词或重要进展 10 年变化

Table 6 Annual variations of research topics or main keywords in the four research fields

年份	海冰与海洋	生物与生态系统	冰川退缩与冻土退化	大气、天气和气候系统
2009	淡水注入、海洋酸化、海冰对欧亚大陆冬季气候的影响	北极气候变暖的生态后果评估、对海洋生物多样性的影响	欧洲多年冻土变化的空间分布、冻土区 CH ₄ 排放和径流增加	CH ₄ 排放、北极变暖原因、天气变化的机制
2010	海冰减少对北极生态系统和北半球大陆冬季气候的影响、淡水注入、污染	氮沉积威胁植物多样性、生物代谢率对变暖的响应具有地域异质性、北极独特的土壤细菌群落多样性、水华、植物扩张	雪冰物理、冻土变暖	CH ₄ 排放、北极放大的主导原因是海冰减少、大气组分和气候变暖因素、平流层气候和环流对温室气体增加和臭氧恢复的响应、气溶胶
2011	淡水注入、海平面上升、海洋酸化	气候变暖导致北极海洋生态系统发生明显变化、植物扩张、物种北移、驯鹿减少	冻土碳释放量和时间	气溶胶、发现气候变暖中的转折点
2012	淡水注入、海冰最小值	苔原植被生产力提高、高通量测序技术分离稀有细菌、浮游植物繁盛、苔藓的恢复力和功能	冰动力学	CMIP5 模型揭示气候变暖热点、北极放大与中纬度极端天气的关系、气候变暖信号识别、混合相云对北极的辐射通量有很大影响
2013	北极航道、海冰量估算、无冰期推测	北极森林火灾风险高、苔原被长期变暖重塑、植被变化预测、海洋食物链关键物种发现、二氧化碳季节性交换量增加		北极放大与中纬度极端天气间的机制联系、北方温度季节性减小、臭氧变化估算、大气边界层模拟、全球变暖的现实情况比报道的更加糟糕
2014	海冰减少对天气和气候的影响、海冰融化期变长、污染物在海洋生物中富集	汞(来源、分布、食物链富集)、海洋渔获资源增加、北冰洋似从极地到温带模式转变、北极淡水中的碳处理受阳光控制、微生物(生理、分布、分解有机碳)、北极物种重大分布变化和丰度减少	冻土退化释放有机碳	北极放大对中纬度天气的影响、水合物渗漏
2015	淡水注入与输出、海冰减少对大气系统的影响、微塑料	北冰洋:底栖动物、水华、物种北移、哺乳动物栖息地变化、食物网结构改变、初级生产力提高;植物生理、微生物利用古碳、碳排放	冻土退化释放有机碳、冻土退化对淡水资源的影响、格陵兰冰盖本底数据(冰层厚度、潮水冰川崩解速率空间分布、冰流数量)	北极放大对中纬度天气的影响、气溶胶、云微物理性质和过程
2016	淡水对北极海洋系统的影响、海冰减少及其对中纬度气候的影响、海冰变化趋势	全球变化影响生态系统稳态转换时可能叠加乘数效应、新指标“植被敏感性指数”证实北极苔原对气候变暖的反映增强、植物群落分类	冻土水文、冻土有机碳释放的净碳平衡估算	CH ₄ 排放、北极放大对中纬度天气的影响、气溶胶
2017	海冰减少原因:淡水注入、夏季大气环流、表面混合层出现;海冰减少对中国霾天气和东西洋流的影响、海平面测算、污染	北极影响全球化风险管理、苔原吸收大气元素汞为北极汞污染重要原因、闪电是森林大火主要驱动力、北冰洋大陆架水域生物产量增加、苔原植物呼吸增加北极二氧化碳含量、变暖迫使叶片高温耐受性增强	格陵兰冰盖对海平面上升的贡献	IPCC 目前还不存在完全耦合的气候平衡模型来模拟和告知气候变暖的影响、北极放大对中纬度天气的影响、确定“工业前时期”的期限
2018	淡水注入、海冰减少对大气的影响、无冰情景预测、海冰和积雪量预测、海洋酸化、污染	底栖动物多样性、北冰洋汞的主要来源是北极的河流和海岸侵蚀、北极碳库失稳加剧、物种濒危多因人害	格陵兰冰盖对海平面上升的贡献、冻土水文、冻土退化对汞循环影响的估算	北极放大对中纬度天气的影响
共有词	海冰减少		格陵兰冰盖物质平衡亏损	北极放大

注: *共有词定义为在分析时段内, 每一年都出现的词汇。

冰盖物质平衡亏损、北极放大贯穿了整个10年,是研究的核心与关键。海冰与海洋研究中,淡水注入、污染、海冰减少对北半球大陆冬季气候的影响是持续受到关注的方面,2012年出现的海冰最小值引发后续的海冰量估算、无冰期推测研究。气候变暖对生态系统产生内容广泛、层次各异的多维度影响是生物与生态系统研究的核心,纵观10年研究,基本还是以生态系统中的单个要素或现象为研究切入点,展示其变化、分析其原因,这些研究可为后续系统地发现要素间联系与相互间的影响反馈机制提供基础资料。冻土有机碳释放是冰川退缩与冻土退化研究中的重点,从对本底情况的认知(欧洲多年冻土变化的空间分布、格陵兰冰盖本底数据)、微观机理的探究(雪冰物理、冰动力学)到融水的水文特征,再到对海平面上升影响的估算,该方向的研究是立体的、全方位推进的。大气、天气和气候系统研究中,北极放大是气候变暖在北极呈现的核心特征,探究北极变暖的原因、测算 CH_4 排放和臭氧变化、识别气候变暖的信号、刻画北极放大对中纬度天气的影响、认识微观机理,该方向研究也是多维度推进,且是不确定性表现得最为集中的研究方向,甚至直至2017年,IPCC还不存在完全耦合的气候平衡模型来模拟和告知气候变暖的影响,还在确定“工业前时期”的期限。总体而言,10年北极各方向研究主题并未呈现明显趋势性的变化,而呈全方位、多角度推进的态势,这也是一个领域处于发展期而呈现的明显特点。

4.2 展望

北极研究中,“不确定性”是其主要特征。原因一是前期研究对北极自然环境本底状况和反馈机制(局地反馈、全球反馈)的认识不深刻,其二是北极后续变化受到诸多人为因素的影响(CO_2 排放、北极资源开发等)。倪杰等在对北极冻土碳循环的研究中也阐述了该特点^[124]。减少、纠正、解决不确定性,通过获取跨纬度、跨区域的多点同步、对比观测研究数据集、发现反馈机制、厘清多要素的影响力、完善和发展算法、构建更多模型组件优化模型等,可望得以完善或解决。

纵观408篇高影响论文,总体呈现数据源类型和范围、分析方法,以及对比参照系的全球尺度特点,多数论文中出现“最长时间序列”、成百上千计的样本数量、跨越几十年的观测数据等等。以中国作者为第一作者的8篇论文中,基本是采用卫星数

据、再分析数据、以模型模拟的形式,以对大量数据集的分析和模拟,来研究北极海冰减少的原因及对中纬度天气系统的影响、海平面上升中格陵兰冰盖的贡献度,或以北极作为参照地区开展对比研究。这种现状与观测设备和平台零散、自主采集数据区域受限、北极研究的制度歧视与知识垄断密切相关^[125],是中国拓展北极研究的重要限制因素。对照现状,如何积极拓展北极研究通道,从制度构建、平台建设、内容设计、数据获取、人才培养等诸多方面打破当前困境,亟需从定性的、理论的建议落实到可量化、可操作的具体行动。我国冰冻圈研究成果丰硕^[126],基础理论和方法、寒区工程建设的实践经验均很丰富,这是很好的基础;北极研究处于全面发展的阶段,各种研究力量和研究方向远未达到固化的程度,是积极参与争取科学话语权的好时机;利用好这些有利条件,把握时机,可望对北极研究有所推进。

5 结论

从高影响论文揭示的北极研究现状来看,目前已形成以美国全方位绝对控制的北极研究格局,其作者、研究机构、期刊和基金资助机构数量,都处于遥遥领先的地位。美国除自有机构密切合作而形成强大研究机构合作集群外,还与环北极国家顶级科研机构合作形成跨国合作集群。

北极研究已形成以气候变暖为核心和背景,辐射相关海冰和海洋、生物与典型生态系统(生物多样性适应与保护、北方针叶林、苔原、微生物)、冰川退缩与冻土退化、温室气体和气溶胶、气候影响等领域的整体研究格局。呈现出由大数据支持、以模型运算为主的突出特点。北极研究立足北极,着眼全球,以行星地球的整体视角获取和分析数据、建立对比参照系。

不确定性是北极研究的重要特点,也是多个关键性科学问题的共同点,分布在北极研究的几乎各个领域,主要包括四个方面:气候变暖的本底认识和预测、气候变暖的影响、多圈层相互作用机制、北极对中纬度天气的影响。10年北极研究,海冰减少、格陵兰冰盖物质平衡亏损、北极放大一直是重点,期间各方向研究主题并未呈现明显趋势上的变化,呈全方位、多角度推进的发展态势。

中国的北极研究,由于各种限制未能深入、广泛地开展,从高影响论文视角呈现合作参与、外围

相关、微量切入的特点。在全球变化的背景下,加强北极研究势在必行,形势严峻亟待突破,利用我国冰冻圈科学研究已取得的基础,把握参与时机,可望对北极研究有所推进。

参考文献(References):

- [1] Schoolmeester T, Gjerdi H L, Crump J, et al. Global Linkages: a graphic look at the changing Arctic (rev. 1)[R]. UN Environment and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal, 2019.
- [2] Kjeldsen K K, Korsgaard N J, Bjork A A, et al. Spatial and temporal distribution of mass loss from the Greenland Ice Sheet since AD 1900[J]. *Nature*, 2015, 528(7582): 396-400.
- [3] Pearson R G, Phillips S J, Lorant M M, et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7): 673-677.
- [4] Dillon M E, Wang G, Huey R B. Global metabolic impacts of recent climate warming[J]. *Nature*, 2010, 467(7316): 704-708.
- [5] Schuur E A G, Vogel J G, Crummer K G, et al. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra[J]. *Nature*, 2009, 459(7246): 556-559.
- [6] China's Arctic Strategy[EB/OL]. (2018-01-26) [2019-10-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2018-01/26/content_5260891.htm. [中国的北极政策[EB/OL]. (2018-01-26) [2019-10-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2018-01/26/content_5260891.htm.]
- [7] Yang Zhenjiao, Dong Hainan. An overview of researches in Arctic environment[J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2012(4): 26-32. [杨振姣,董海楠. 北极环境问题研究综述[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2012(4): 26-32.]
- [8] Yang Zhenjiao, Sun Xuemin, Xin Meijun. A review of the problem of energy security in the Arctic governance[J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2015(5): 25-33. [杨振姣,孙雪敏,辛美君. 北极能源安全问题研究综述[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2015(5): 25-33.]
- [9] Li Zhenfu, Chen Zhuo, Chen Xue, et al. Development of the Arctic passage and construction of the "silk road on ice": a literature review[J]. *Journal of Ocean University of China (Social Sciences)*, 2018(6): 7-18. [李振福,陈卓,陈雪,等. 北极航线开发与“冰上丝绸之路”建设:一个文献综述[J]. *中国海洋大学学报(社会科学版)*, 2018(6): 7-18.]
- [10] Guo Nanrong, Hu Maixiu. A review: interests brought by the Arctic passage[J]. *Ocean Development and Management*, 2018, 35(10): 51-54. [郭楠蓉,胡麦秀. 北极航道利益研究综述[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(10): 51-54.]
- [11] Li Zhenfu, Wang Wenya, You Xue, et al. A review: problems of the Arctic and the Arctic passage[J]. *Journal of Dalian Maritime University (Social Sciences Edition)*, 2014, 13(4): 26-30. [李振福,王文雅,尤雪,等. 北极及北极航线问题研究综述[J]. *大连海事大学学报(社会科学版)*, 2014, 13(4): 26-30.]
- [12] Liu Yutong. Study on Arctic strategy of the United States from Obama Administration[D]. Changchun: Jilin University, 2017. [刘昱彤. 奥巴马政府以来的美国北极战略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.]
- [13] Zhang Penfei. Research of the Arctic policy and decision-making mechanism of Russia[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. [张朋飞. 俄罗斯北极政策及其决策机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.]
- [14] Chen Xulun. The Arctic strategies between Russia and the United States after the cold war period[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2017. [陈旭伦. 冷战后美俄北极战略研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2017.]
- [15] Chen Fei. A comparative study of Arctic strategies between Russia and the United States and its implications for China[D]. Xiantan: Xiantan University, 2012. [陈飞. 俄美北极战略比较研究及其对中国的启示[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.]
- [16] Niu Yibo, Zhang Shuliang, Zhao Jidong, et al. Comprehensive evaluation and analysis of the international polar research from 2010—2016[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(5): 1039-1046. [牛艺博,张树良,赵纪东,等. 2010—2016年国际极地研究综合评价分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(5): 1039-1046.]
- [17] Yu Weiyang, Wang Lin, Feng Zhigang, et al. Bibliometric analysis and development trends of global Arctic marine scientific research[J]. *Marine Science*, 2018, 42(10): 64-81. [於维樱,王琳,冯志纲,等. 1998—2017年国际北极地区海洋科学研究文献计量与发展态势[J]. *海洋科学*, 2018, 42(10): 64-81.]
- [18] Ye Binrong, Cheng Yang, Wang Li, et al. A systematic review of geo-relations research in the Arctic[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(4): 489-505. [叶滨鸿,程杨,王利,等. 北极地区地缘关系研究综述[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(4): 489-505.]
- [19] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979—2010[J]. *Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889.
- [20] Parkinson C L, Comiso J C. On the 2012 record low Arctic sea ice cover: Combined impact of preconditioning and an August storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1-6.
- [21] Overland J E, Wang M Y. Large-scale atmospheric circulation changes are associated with the recent loss of Arctic sea ice[J]. *Tellus Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2010, 62(1): 1-9.
- [22] Zhang J L, Lindsay R, Schweiger A, et al. The impact of an intense summer cyclone on 2012 Arctic sea ice retreat[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(4): 720-726.
- [23] Ding Q H, Schweiger A, L'Heureux M, et al. Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 289-295.
- [24] Woods C, Caballero R. The role of moist intrusions in winter Arctic warming and sea ice decline[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(12): 4473-4485.
- [25] Meyer A, Sundfjord A, Fer I, et al. Winter to summer oceanographic observations in the Arctic Ocean north of Svalbard[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(8): 6218-6237.
- [26] Carmack E C, Yamamoto-Kawai M, Haine T W N, et al. Freshwater and its role in the Arctic Marine System: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3): 675-717.
- [27] Proshutinsky A, Krishfield R, Timmermans M L, et al. Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114: C00A10. DOI: 10.1029/2008JC005104.
- [28] Morison J, Kwok R, Peralta-Ferriz C, et al. Changing Arctic Ocean freshwater pathways[J]. *Nature*, 2012, 481(7379): 66-70.
- [29] Woodgate R A. Increases in the Pacific inflow to the Arctic from 1990 to 2015, and insights into seasonal trends and driving mechanisms from year-round Bering Strait mooring data[J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 160: 124-154.
- [30] Kohl, A. Evaluation of the GECCO2 ocean synthesis: transports

- of volume, heat and freshwater in the Atlantic [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141 (686) : 166-181.
- [31] Polyakov I V, Pnyushkov A V, Alkire M B, et al. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean [J]. *Science*, 2017, 356 (6335) : 285-292.
- [32] Spielhagen R F, Werner K, Sorensen S A, et al. Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water [J]. *Science*, 2011, 331 (6016) : 450-453.
- [33] Smith M, Stammerjohn S, Persson O, et al. Episodic reversal of autumn ice advance caused by release of ocean heat in the Beaufort Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(5) : 3164-3185.
- [34] Thomson J, Rogers W E. Swell and sea in the emerging Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41 (9) : 3136-3140.
- [35] Stammerjohn S, Massom R, Rind D, et al. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L06501. DOI: 10.1029/2012GL050874.
- [36] Perovich D K, Polashenski C. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L08501. DOI: 10.1029/2012GL051432.
- [37] Stroeve J C, Markus T, Boisvert L, et al. Changes in Arctic melt season and implications for sea ice loss [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(4) : 1216-1225.
- [38] Meier W N, Hovelsrud G K, van Oort B E H, et al. Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3) : 185-217.
- [39] Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109 (11) : 4074-4079.
- [40] Tang Q H, Zhang X J, Yang X H, et al. Cold winter extremes in northern continents linked to Arctic sea ice loss [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8 (1) : 14036. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/014036.
- [41] Luo D H, Xiao Y Q, Yao Y, et al. Impact of Ural Blocking on winter Warm Arctic-Cold Eurasian Anomalies. Part I: blocking-induced amplification [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29 (11) : 3925-3947.
- [42] Petoukhov V, Semenov V A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115: D21111. DOI: 10.1029/2009JD013568.
- [43] Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12) : 869-873.
- [44] Honda M, Inoue J, Yamane S. Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L08707. DOI: 10.1029/2008GL037079.
- [45] Francis J A, Chan W H, Leathers D J, et al. Winter northern hemisphere weather patterns remember summer Arctic sea-ice extent [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L07503. DOI: 10.1029/2009GL037274.
- [46] Zou Y F, Wang Y H, Zhang Y Z, et al. Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China [J]. *Science Advances*, 2017, 3: e1602751. DOI: 10.1126/sciadv.1602751.
- [47] Wang H J, Chen H P. Understanding the recent trend of haze pollution in eastern China: roles of climate change [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(6) : 4205-4211.
- [48] Post E, Bhatt U S, Bitz C M, et al. Ecological consequences of sea-ice decline [J]. *Science*, 2013, 341(6145) : 519-524.
- [49] Sevellec F, Fedorov A V, Liu W. Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic meridional overturning circulation [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(8) : 604-610.
- [50] Smith L C, Stephenson S R. New Trans-Arctic shipping routes navigable by midcentury [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (13) : E1191-E1195.
- [51] Pankhurst N W, Munday P L. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2011, 62(9) : 1015-1026.
- [52] Arrigo K R, van Dijken G L. Continued increases in Arctic Ocean primary production [J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136: 60-70.
- [53] Boetius A, Albrecht S, Bakker K, et al. Export of algal biomass from the melting Arctic sea ice [J]. *Science*, 2013, 339(6126) : 1430-1432.
- [54] Li W K W, McLaughlin F A, Lovejoy C, et al. Smallest algae thrive as the Arctic Ocean freshens [J]. *Science*, 2009, 326 (5952) : 539-539.
- [55] Arrigo K R, Perovich D K, Pickart R S, et al. Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice [J]. *Science*, 2012, 336 (6087) : 1408-1409.
- [56] Haug T, Bogstad B, Chierici M, et al. Future harvest of living resources in the Arctic Ocean north of the Nordic and Barents Seas: a review of possibilities and constraints [J]. *Fisheries Research*, 2017, 188: 38-57.
- [57] Fosheim M, Primicerio R, Johannesen E, et al. Recent warming leads to a rapid borealization of fish communities in the Arctic [J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5(7) : 673-677.
- [58] Myers-Smith I H, Forbes B C, Wilmking M, et al. Shrub expansion in tundra ecosystems: dynamics, impacts and research priorities [J]. *Environmental Research Letters*, 2011, 6: 45509. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045509.
- [59] Hallinger M, Manthey M, Wilmking M. Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia [J]. *New Phytologist*, 2010, 186(4) : 890-899.
- [60] Sistla S A, Moore J C, Simpson R T, et al. Long-term warming restructures Arctic tundra without changing net soil carbon storage [J]. *Nature*, 2013, 497(7451) : 615-618.
- [61] Wullschleger S D, Epstein H E, Box E O, et al. Plant functional types in Earth system models: past experiences and future directions for application of dynamic vegetation models in high-latitude ecosystems [J]. *Annals of Botany*, 2014, 114(1) : 1-16.
- [62] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, et al. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability [J]. *Nature*, 2016, 531(7593) : 229-232.
- [63] Kelly R, Chipman M L, Higuera P E, et al. Recent burning of boreal forests exceeds fire regime limits of the past 10 000 years [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(32) : 13055-13060.
- [64] Veraverbeke S, Rogers B M, Goulden M L, et al. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests [J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7) : 529-534.
- [65] Laidre K L, Stern H, Kovacs K M, et al. Arctic marine mammal population status, sea ice habitat loss, and conservation recommendations for the 21st century [J]. *Conservation Biology*,

- 2015, 29(3):724-737.
- [66] Kjesbu O S, Bogstad B, Devine J A, et al. Synergies between climate and management for Atlantic cod fisheries at high latitudes[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9):3478-3483.
- [67] Erkinaro J, Czorlich Y, Orell P, et al. Life history variation across four decades in a diverse population complex of Atlantic salmon in a large subarctic river[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2019, 76(1):42-55.
- [68] Cheung W W L, Lam V W Y, Sarmiento J L, et al. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1):24-35.
- [69] Wassmann P, Duarte C M, Agusti S, et al. Footprints of climate change in the Arctic marine ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2):1235-1249.
- [70] Knief C. Diversity and habitat preferences of cultivated and uncultivated aerobic methanotrophic bacteria evaluated based on *pmoA* as molecular marker [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2015, 6:1346. DOI:10.3389/fmicb.2015.01346.
- [71] Chu H Y, Fierer N, Lauber C L, et al. Soil bacterial diversity in the Arctic is not fundamentally different from that found in other biomes [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, 12(11):2998-3006.
- [72] Bergmann M, Wirzberger V, Krumpfen T, et al. High quantities of microplastic in Arctic deep-sea sediments from the HAUSGARTEN Observatory [J]. *Environmental Science Technology*, 2017, 51(19):11000-11010.
- [73] Cozar A, Marti E, Duarte C M, et al. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation[J]. *Science Advances*, 2017, 3(4):e1600582. DOI:10.1126/sciadv.1600582.
- [74] Lusher A L, Tirelli V, O'Connor I, et al. Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:14947. DOI:10.1038/srep14947.
- [75] Walker T W, Jones D B A, Parrington M, et al. Impacts of mid-latitude precursor emissions and local photochemistry on ozone abundances in the Arctic[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D01305. DOI: 10.1029/2011JD016370.
- [76] Box J E, Fettweis X, Stroeve J C, et al. Greenland ice sheet albedo feedback: thermodynamics and atmospheric drivers [J]. *Cryosphere* 2012, 6(4):821-839.
- [77] Machguth H, MacFerrin M, van As D, et al. Greenland meltwater storage in firn limited by near-surface ice formation[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4):390-393.
- [78] Straneo F, Hamilton G S, Sutherland D A, et al. Rapid circulation of warm subtropical waters in a major glacial fjord in East Greenland[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(3):182-186.
- [79] Luckman A, Benn D I, Cottier F, et al. Calving rates at tidewater glaciers vary strongly with ocean temperature [J]. *Nature Communications*, 2015, 6:8566. DOI:10.1038/ncomms9566.
- [80] Enderlin E M, Howat I M, Jeong S, et al. An improved mass budget for the Greenland ice sheet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(3):866-872.
- [81] Gardner A S, Moholdt G, Wouters B, et al. Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago[J]. *Nature*, 2011, 473(7347):357-360.
- [82] Tedesco M, Fettweis X, Mote T, et al. Evidence and analysis of 2012 Greenland records from spaceborne observations, a regional climate model and reanalysis data [J]. *Cryosphere*, 2013, 7(2):615-630.
- [83] Nghiem S V, Hall D K, Mote T L, et al. The extreme melt across the Greenland ice sheet in 2012[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39:L20502. DOI:10.1029/2012GL053611.
- [84] Moon T, Joughin I, Smith B, et al. 21st-century evolution of Greenland outlet glacier velocities [J]. *Science*, 2012, 336(6081):576-578.
- [85] Hoffman M J, Perego M, Andrews L C, et al. Widespread Moulin formation during supraglacial lake drainages in Greenland [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(2):778-788.
- [86] Doyle S H, Hubbard B, Christoffersen P, et al. Physical conditions of fast glacier flow: 1. Measurements from boreholes drilled to the bed of store glacier, west Greenland [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(2):324-348.
- [87] Sundal A V, Shepherd A, Nienow P, et al. Melt-induced speed-up of Greenland ice sheet offset by efficient subglacial drainage [J]. *Nature*, 2011, 469(7331):521-524.
- [88] Margold M, Stokes C R, Clark C D. Ice streams in the Laurentide Ice Sheet: Identification, characteristics and comparison to modern ice sheets [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 143:117-146.
- [89] Van Tricht K, Lhermitte S, Lenaerts J T M, et al. Clouds enhance Greenland ice sheet meltwater runoff [J]. *Nature Communications*, 2016, 7:10266. DOI:10.1038/ncomms10266.
- [90] Bennartz R, Shupe M D, Turner D D, et al. July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds [J]. *Nature*, 2013, 496(7443):83-86.
- [91] Ryan J C, Hubbard A, Stibal M, et al. Dark zone of the Greenland Ice Sheet controlled by distributed biologically-active impurities [J]. *Nature Communications*, 2018, 9:1065. DOI:10.1038/s41467-018-03353-2.
- [92] Romanovsky V E, Smith S L, Christiansen H H. Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during the international polar year 2007—2009: a synthesis [J]. *Permafrost Periglacial Process*, 2010, 21(2):106-116.
- [93] Bring A, Fedorova I, Dibike Y, et al. Arctic terrestrial hydrology: a synthesis of processes, regional effects, and research challenges [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(3):621-649.
- [94] Ala-aho P, Soulsby C, Pokrovsky O S, et al. Using stable isotopes to assess surface water source dynamics and hydrological connectivity in a high-latitude wetland and permafrost influenced landscape [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556:279-293.
- [95] Liljedahl A K, Boike J, Daanen R P, et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(4):312-318.
- [96] Walvoord M A, Kurylyk B L. Hydrologic impacts of thawing permafrost: a review [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(6). DOI:10.2136/vzj2016.01.0010.
- [97] Dlugokencky E J, Bruhwiler L, White J W C. Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L18803. DOI:10.1029/2009GL039780.
- [98] Bloom A A, Palmer P I, Fraser A, et al. Large-scale controls of methanogenesis inferred from methane and gravity spaceborne data[J]. *Science*, 2010, 327(5963):322-325.
- [99] Guimberteau M, Zhu D, Maignan F, et al. ORCHIDEE-MICT (v8.4.1), a land surface model for the high latitudes: model de-

- scription and validation[J]. *Geoscientific Model Development*, 2018, 11(1):121-163.
- [100] Schaefer H, Fletcher S E M, Veidt C, et al. A 21st-century shift from fossil-fuel to biogenic methane emissions indicated by CH₄-C-13[J]. *Science*, 2016, 352(6281):80-84.
- [101] Sun Xiaoxin, Song Changchun, Wang Xianwei, et al. Effect of permafrost degradation on methane emission in wetlands: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18):5379-5386. [孙晓新, 宋长春, 王宪伟, 等. 多年冻土退化对湿地甲烷排放的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(18):5379-5386.]
- [102] Shakhova N, Semiletov I, Salyuk A, et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the east siberian Arctic shelf[J]. *Science*, 2010, 327(5970):1246-1250.
- [103] Westbrook G K, Thatcher K E, Rohling E J, et al. Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L15608. DOI:10.1029/2009GL039191.
- [104] Ruppel C D, Kessler J D. The interaction of climate change and methane hydrates [J]. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(1):126-168.
- [105] Berndt C, Feseker T, Treude T, et al. Temporal constraints on hydrate-controlled methane seepage off Svalbard[J]. *Science*, 2014, 343(6168):284-287.
- [106] Wofsy S C. HIAPER Pole-to-Pole Observations (HIPPO): fine-grained, global-scale measurements of climatically important atmospheric gases and aerosols[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1943):2073-2086.
- [107] Cubison M J, Ortega A M, Hayes P L, et al. Effects of aging on organic aerosol from open biomass burning smoke in aircraft and laboratory studies[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11(23):12049-12064.
- [108] Kawamura K, Bikkina S. A review of dicarboxylic acids and related compounds in atmospheric aerosols: Molecular distributions, sources and transformation [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 170:140-160.
- [109] Overland J E, Dethloff K, Francis J A, et al. Nonlinear response of mid-latitude weather to the changing Arctic[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11):992-999.
- [110] Overland J, Francis J A, Hall R, et al. The Melting Arctic and mid-latitude weather patterns: are they connected? [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28:7917-7932.
- [111] Sun L, Perlwitz J, Hoerling M. What caused the recent "Warm Arctic, Cold Continents" trend pattern in winter temperatures? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(10):5345-5352.
- [112] Yao Y, Luo D H, Dai A G, et al. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural Blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part I: Insights from observational analyses [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(10):3549-3568.
- [113] Cohen J, Pfeiffer K, Francis J A. Warm Arctic episodes linked with increased frequency of extreme winter weather in the United States [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 869. DOI: 10.1038/s41467-018-02992-9.
- [114] Kretschmer M, Coumou D, Agel L, et al. More-persistent weak stratospheric polar vortex states linked to cold extremes [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(1):49-60.
- [115] Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10):759-762.
- [116] Walsh J E. Intensified warming of the Arctic: causes and impacts on middle latitudes [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 117:52-63.
- [117] Barnes E A, Dunn-Sigouin E, Masato G, et al. Exploring recent trends in Northern Hemisphere blocking [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(2):638-644.
- [118] Barnes E A, Screen J A. The impact of Arctic warming on the mid-latitude jet-stream: Can it? Has it? Will it? [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2015, 6:277-286.
- [119] Coumou D, Lehmann J, Beckmann J. The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes [J]. *Science*, 2015, 348(6232):324-327.
- [120] Screen J A. Arctic amplification decreases temperature variance in northern mid- to high-latitudes [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7):577-582.
- [121] Screen J A, Simmonds I. Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(5):959-964.
- [122] Barnes E A. Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40:4734-4739.
- [123] Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(9):627-637.
- [124] Ni Jie, Wu Tonghua, Zhao Lin, et al. Carbon cycle in Arctic permafrost regions: progress and prospect [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4):1-17. [[倪杰, 吴通华, 赵林, 等. 北极多年冻土区碳循环研究进展与展望[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4):1-17.]
- [125] Xiao Yang. Arctic scientific cooperation: institutional discrimination and the emerging monopoly [J]. *International Forum*, 2019, 21(1):103-113;158-159. [肖洋. 北极科学合作: 制度歧视与垄断生成 [J]. *国际论坛*, 2019, 21(1):103-113;158-159.]
- [126] Xiao Cunde, Su Bo, Wang Xiaoming, et al. Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(19):1975-1984. [效存德, 苏勃, 王晓明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险 [J]. *科学通报*, 2019, 64(19):1975-1984.]

ESI top papers reveal the characteristics in Arctic natural science research

NING Baoying

*(Lanzhou Information Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences,
Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Climate warming is amplified in the Arctic and accompanied by sea ice decline, which makes it possible for resource exploration and opening new sea channels. The importance of the Arctic region is becoming increasingly prominent. With the aim to understand the most influential research forces and fields in Arctic research, to provide the most comprehensive analysis of scientific research information, and to reveal the existing problems in Chinese current research, 408 ESI top papers on Arctic research in the last decade were analyzed, including number of papers, authors, research institutions, countries and research areas. It is found that the United States dominates the Arctic research (number of papers, authors, institutions, funding funds). The Arctic research fields include sea ice and oceans, organisms and typical ecosystems (adaptation and protection of biodiversity, boreal forests, tundra, microorganisms), glacier retreat and permafrost degradation, atmosphere, weather and climate system and other related fields. A great number of studies characterized by using large data and model operation, but “uncertainty” is common in all the fields. China conducts Arctic research in a cooperative, participatory, periphery-related and micro-entry manner. There are multiple constraints for China to conduct Arctic research. China may take advantage of the existing achievements in cryosphere research, actively participate in all fields of arctic research and data sharing, and focus on the impact of Arctic climate on mid-latitude regions to provide support in hazards prevention and mitigation, and thus improve ecological environment in China as well.

Key words: ESI top papers; Arctic; climate warming; glacial retreat; permafrost degradation; sea ice loss

(责任编辑: 吴晓东; 编辑: 周成林)